

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

PCT/DE 00/01835

09/762985

PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)



REC'D 16 AUG 2000
WIPO PCT

DE 00/01835

Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

E J K W

Aktenzeichen: 199 33 842.6
Anmeldetag: 20. Juli 1999
Anmelder/Inhaber: ROBERT BOSCH GMBH,
Stuttgart/DE
Bezeichnung: Vorrichtung und Verfahren zum Ätzen eines
Substrates mittels eines induktiv gekoppelten
Plasmas

IPC: H 01 J, H 01 L

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Anmeldung.

München, den 13. Juli 2000
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

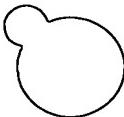
16.07.99 Kut

5

ROBERT BOSCH GMBH, 70442 Stuttgart

Vorrichtung und Verfahren zum Ätzen eines Substrates
mittels eines induktiv gekoppelten Plasmas

10



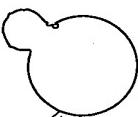
15

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein damit durchführbares Verfahren zum Ätzen eines Substrates, insbesondere eines Siliziumkörpers, mittels eines induktiv gekoppelten Plasmas nach der Gattung der unabhängigen Ansprüche.

Stand der Technik

20

Um ein anisotropes Hochratenätzenverfahren beispielsweise für Silizium unter Einsatz einer induktiven Plasmaquelle zu realisieren, ist es bei Verfahren, wie sie beispielsweise aus DE 42 41 045 C2 bekannt sind, erforderlich, in möglichst kurzer Zeit eine effiziente Seitenwandpassivierung während sogenannter Passivierschritte durchzuführen und ferner eine möglichst hohe Konzentration von Silizium ätzenden Fluorradikalen während sogenannter Ätzschritte zu erreichen.



30

Zur Erhöhung der Ätzrate ist es dabei naheliegend, mit möglichst hohen Hochfrequenzleistungen an der induktiven Plasmaquelle zu arbeiten und dadurch möglichst hohe Plasmaleistungen in das erzeugte induktiv gekoppelte Plasma einzukoppeln.

Diesen eingekoppelbaren Plasmaleistungen sind jedoch Grenzen gesetzt, die sich einerseits aus der Belastbarkeit der elektrischen Komponenten der Plasmaquelle ergeben, andererseits aber auch prozeßtechnischer Natur sind. So verstärken hohe Hochfrequenzleistungen der induktiven Plasmaquelle, d.h. hohe einzukoppelnde Plasmaleistungen, schädliche elektrische Eingriffe aus dem Quellenbereich in das erzeugte induktiv gekoppelte Plasma, die die Ätzergebnisse auf dem Substratwafer verschlechtern.

5

10

Zudem treten bei Ätzprozessen nach Art der DE 42 41 045 C2 bei sehr hohen Plasmaleistungen auch Stabilitätsprobleme bei der Plasmaeinkoppelung in den Umschaltphasen zwischen Ätz- und Passivierschritten auf. Dies beruht darauf, daß sich bei hohen einzukoppelnden Leistungen im kWatt-Bereich während der Umschaltphasen auftretende Leistungsreflektionen und Spannungsüberhöhungen zerstörerisch im elektrischen Kreis der Plasmaquelle (Spule, angeschlossene Kapazitäten,

15

Generatorenendstufe usw.) auswirken.

20

In der Anmeldung DE 199 00 179 ist dazu bereits eine gegenüber der DE 42 41 045 C2 weiterentwickelte induktive Plasmaquelle beschrieben, die mittels einer verlustfreien symmetrischen Hochfrequenzspeisung der Spule der induktiven Plasmaquelle für besonders hohe Plasmaleistungen geeignet ist, und die ein induktives Plasma generiert, welches besonders arm an Stöeinkopplungen ist. Doch auch für diesen

25

Quellentyp existiert eine praktikable Leistungsgrenze von etwa 3 kWatt bis 5 kWatt, oberhalb der die benötigten Hochfrequenzkomponenten extrem teuer werden oder Probleme hinsichtlich der Plasmastabilität überhand nehmen.

30

Aus der Anmeldung DE 199 198 32 ist weiter bereits bekannt, die in ein induktiv gekoppeltes Plasma mit einem

hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeld eingekoppelte Plasmaleistung adiabatisch zwischen einzelnen Verfahrensschritten, insbesondere alternierenden Ätz- und Passivierschritten, zu variieren.

5

Ein derartiger adiabatischer Leistungsübergang, d.h. ein allmähliches Hochfahren bzw. Verringern der eingekoppelten Plasmaleistung, bei gleichzeitiger kontinuierlicher Anpassung der Impedanz der ICP-Quelle an die jeweilige, von der eingekoppelten Plasmaleistung abhängige Plasmaimpedanz mittels eines automatischen Anpaßnetzwerkes oder eines Impedanztransformators („Matchbox“) ermöglicht es, die erläuterten Probleme hinsichtlich Leistungsreflexion und Spannungsüberhöhung beim Ein- und Ausschalten von Plasmaleistungen im Bereich von 1 kWatt bis 5 kWatt zu beherrschen. Eine typische Zeitdauer der Einschaltvorgänge liegt dabei jedoch im Bereich von 0,1 sec bis 2 sec. Schnellere Leistungsänderungen sind mit diesem Ansatz nicht möglich.

10

15

20

Vorteile der Erfindung

Die erfindungsgemäße Vorrichtung und das damit durchgeföhrte Verfahren hat gegenüber dem Stand der Technik den Vorteil, daß damit eine variabel einstellbare, gepulste Hochfrequenzleistung erzeugt wird, die als Plasmaleistung in das induktiv gekoppelte Plasma einkoppelbar ist, wobei die

25

Pulsung der Plasmaleistung sehr schnell, beispielsweise innerhalb von Mikrosekunden, erfolgen und gleichzeitig mit Leistungsänderungen von mehreren tausend Watt verbunden sein kann.

30

Die vorgenommene Pulsung der Plasmaleistung ist weiter mit einer wesentlichen Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der

ICP-Quelle verbunden und eröffnet die Möglichkeit zur
Verminderung der mittleren Plasmaleistung ohne
Ätzratenverminderung bzw. zur Ätzratenerhöhung bei
unveränderter mittlerer Plasmaleistung. Weiter lassen sich
5 durch das Pulsen der Plasmaleistung elektrische Störfekte
aus dem Quellenbereich der ICP-Quelle wirksam reduzieren.

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus
den in den Unteransprüchen genannten Maßnahmen.

10 So ist es besonders vorteilhaft, wenn die erfindungsgemäße
Plasmaätzanlage mit einer balancierten, symmetrisch
aufgebauten und symmetrisch gespeisten Konfiguration der
ICP-Quelle versehen ist. Auf diese Weise wird die
15 Homogenität der Ätzraten über die Oberfläche des Substrates
deutlich verbessert und die elektrische Einkopplung von
hohen Plasmaleistungen in das erzeugte Plasma erheblich
vereinfacht.

20 Weiterhin ist vorteilhaft, wenn im Inneren des Reaktors ein
zusätzliches, konstantes oder zeitlich variiierendes
longitudinales Magnetfeld erzeugt wird, das das generierte,
induktiv gekoppelte Plasma von der Plasmaquelle ausgehend
nach der Art einer magnetischen Flasche bis zu dem zu
25 ätzenden Substrat führt.

Dieses Magnetfeld, dessen Richtung zumindest näherungsweise
oder überwiegend parallel zu der durch die Verbindungsgeraden
von Substrat und induktiv gekoppeltem Plasma definierten
Richtung ist, verbessert die Ausnutzung der eingekoppelten
30 Hochfrequenzleistung zur Erzeugung der gewünschten
Plasmaspezies (Elektronen, Ionen, freie Radikale) d.h. die
Effizienz der Plasmageneration deutlich. Daher sind bei

gleicher Plasmaleistung damit zusätzlich deutlich höhere Ätzraten möglich.

5 Eine besonders gute Führung des erzeugten Plasmas durch das Magnetfeld und ein besonders geringer Durchgriff des erzeugten Magnetfeldes auf das zu ätzende Substrat selbst ergibt sich weiter vorteilhaft dann, wenn zusätzlich eine zu der Innenwand des Reaktors konzentrisch angeordnete Apertur vorgesehen ist, die bevorzugt ca. 5 cm oberhalb des auf einer Substratelektrode angeordneten Substrates angeordnet ist. Diese Apertur führt zu einer verbesserten Uniformität der Ätzung über die Substratoberfläche und vermeidet gleichzeitig im Fall eines zeitlich variierenden Magnetfeldes hohe induzierte Spannungen in dem zu ätzenden Substrat, die dort unter Umständen zu Schäden an elektronischen Bauelementen führen.

10
15
20 Sehr vorteilhaft ist weiterhin, wenn in den ICP-Spulengenerator Bauteile integriert sind, die zur Impedanzanpassung als Funktion der einzukoppelnden Plasmaleistung eine Variation der Frequenz des erzeugten elektromagnetischen Wechselfeldes vornehmen, da damit eine besonders schnelle Umschaltung zwischen Plasmaleistungspulsen und Pulspausen erreicht wird.

25 Durch diese Frequenzvariation wird vorteilhaft vermieden, daß zeitweise beim Pulsen der Plasmaleistung, insbesondere in Zeiten einer sich schnell ändernden eingekoppelten Plasmaleistung, d.h. bei Pulse-zu-Pause-Übergängen, hohe reflektierte Leistungen zurück in den ICP-Spulengenerator auftreten. Dabei liegt ein weiterer wesentlicher Vorteil einer jederzeit möglichst guten Impedanzanpassung über einer variable Frequenz der Hochfrequenzleistung des ICP-Spulengenerators darin, daß diese Frequenzänderung sehr

5 schnell durchgeführt werden kann, da sie nur durch die Regelgeschwindigkeit einer die Frequenzvariation durchführenden elektronischen Schaltung begrenzt ist. So sind Reaktionszeiten oder sehr schnelle Leistungsänderungen der Ausgangsleistung des ICP-Spulengenerators im Mikrosekundenbereich stabil möglich, was es erlaubt, während der Ätz- und/oder Passivierschritte mit Plasmaleistungspulsen zu arbeiten, deren Dauer im Mikrosekundenbereich liegt.

10

15

20

25

30

Da bei einem gepulsten Betrieb der ICP-Quelle sehr schnelle Impedanzänderungen im Plasma auftreten, ist es nach dem bisherigen Stand der Technik bei Einzelpulsleistungen im kWatt-Bereich, insbesondere im Bereich oberhalb 3 kWatt unmöglich, das Auftreten hoher reflektierter Leistung beim Ein- und Ausschalten der eingekoppelten Hochfrequenzleistungspulse zu vermeiden oder diese zumindest unschädlich zu machen. Durch die erfindungsgemäße Vorrichtung ist dagegen auch in diesem Fall die Impedanzanpassung von induktiv gekoppeltem Plasma bzw. ICP-Quelle und ICP-Spulengenerator jederzeit sichergestellt.

Ein gepulster Betrieb der ICP-Quelle hat gegenüber einem kontinuierlichen Betrieb weiter den wesentlichen Vorteil, daß während der Hochfrequenzleistungspulse bzw. Plasmaleistungspulse eine wesentlich höhere Plasmadichte erreicht wird als bei einem kontinuierlichen Betrieb. Dies beruht darauf, daß die Erzeugung eines induktiven Plasmas ein hochgradig nichtlinearer Vorgang ist, so daß die mittlere Plasmadichte in diesem gepulsten Betriebsmodus höher ist als bei einer dem Zeitmittel entsprechenden mittleren Plasmaleistung. Man erhält daher, bezogen auf das Zeitmittel, im Pulsbetrieb effektiv mehr reaktive Spezies und Ionen als im Dauerstrichbetrieb. Dies gilt insbesondere

dann, wenn sogenannte „Riesenimpulse“ eingesetzt werden,
d.h. relativ kurze und extrem leistungsstarke
Hochfrequenzleistungsimpulse von beispielsweise 20 kWatt
Spitzenleistung, wie dies mit der erfindungsgemäßen
Vorrichtung nunmehr möglich ist, wobei die mittlere
Plasmaleistung im Zeitmittel dann beispielsweise bei
lediglich 500 Watt liegt.

In diesem Fall sind im übrigen unvermeidbare Wärmeverluste
im ICP-Spulengenerator und anderen Anlagenkomponenten der
Plasmaätzanlage vorteilhaft mit dem relativ niedrigen
Zeitmittelwert der Plasmaleistung korreliert, während
erwünschte Plasmaeffekte, insbesondere die erzielbaren
Ätzraten, vorteilhaft mit den auftretenden Spitzenleistungen
korrelieren. Infolgedessen wird die Effizienz der Erzeugung
reaktiver Spezies und Ionen deutlich verbessert.

Ein weiterer Vorteil eines gepulsten Betriebs der ICP-Quelle
liegt darin, daß sich in den Pausen zwischen den
Hochfrequenzleistungspulsen störende elektrische Aufladungen
auf dem zu ätzenden Substrat entladen können und damit die
Profilkontrolle beim Ätzen insgesamt verbessert wird.

Schließlich ist sehr vorteilhaft, wenn das Pulsen des
erzeugten Magnetfeldes mit dem Pulsen der eingekoppelten
Plasmaleistung und/oder dem Pulsen der über den
Substratspannungsgenerator in das Substrat eingekoppelten
Hochfrequenzleistung zeitlich korreliert oder synchronisiert
wird. So ergibt sich durch die zeitliche Synchronisation der
Pulsung von Magnetfeld und eingekoppelter Plasmaleistung
insbesondere eine deutliche Reduktion der in der
Magnetfeldspule anfallende Ohm'schen Wärmeverluste, was
Probleme der Kühlung und Temperaturkontrolle der
Magnetfeldspule entschärft.

Wird beispielsweise die eingekoppelte Plasmaleistung mit einem Puls-zu-Pause-Verhältnis von 1:20 betrieben, so kann auch der Strom durch die Magnetfeldspule beispielsweise mit einem Puls-zu-Pause-Verhältnis von 1:18 gepulst werden, wodurch sich vorteilhaft die benötigte Wärmeabfuhr aus der Magnetfeldspule auf 1/18 des ursprünglichen Werts reduziert. Gleichzeitig sinkt auch der Verbrauch an elektrischer Energie entsprechend.

5

10

Zeichnungen

15

Ausführungsbeispiele der Erfindung werden anhand der Zeichnungen und in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Es zeigen Figur 1 eine schematisierte Plasmaätzanlage, Figur 2 eine elektronische Rückkopplungsschaltung mit angeschlossener ICP-Quelle, Figur 3 ein Beispiel für eine Filterkennlinie, Figur 4 ein

20

Beispiel für eine zeitliche Synchronisation von in das Plasma eingekoppelten Hochfrequenzplasmaleistungspulsen mit Magnetfeldpulsen, Figur 5 eine in den Substratspannungsgenerator integrierbare Schaltungsanordnung zur Erzeugung sehr kurzer Hochfrequenzleistungspulse, Figur 6 ein Ersatzschaltbild für die Entstehung der Substratelektrodenspannung und Figur 7 die Änderung der Substratelektrodenspannung während eines Hochfrequenzleistungspulses als Funktion der Zahl der Schwingungsperioden.

25

30

Ausführungsbeispiele

Ein erstes Ausführungsbeispiel der Erfindung wird anhand der Figur 1 näher erläutert. Eine Plasmaätzanlage 5 weist dazu zunächst einen Reaktor 15 auf, in dessen oberem Bereich in

an sich bekannter Weise über eine ICP-Quelle 13
("Inductively Coupled Plasma") ein induktiv gekoppeltes
Plasma 14 erzeugt wird. Weiterhin ist eine Gaszufuhr 19 zur
Zufuhr eines Reaktivgases wie beispielsweise SF₆, ClF₃, O₂,
5 C₄F₈, C₃F₆, SiF₄ oder NF₃, eine Gasabfuhr 20 zur Abfuhr von
Reaktionsprodukten, ein Substrat 10, beispielsweise ein mit
dem erfindungsgemäßen Ätzverfahren zu strukturierender
Siliziumkörper oder Siliziumwafer, eine mit dem Substrat 10
in Kontakt befindliche Substratelektrode 11, ein
10 Substratspannungsgenerator 12 und ein erster
Impedanztransformator 16 vorgesehen. Der
Substratspannungsgenerator 12 koppelt dabei in die
Substratelektrode 11 und darüber in das Substrat 10 eine
hochfrequente Wechselspannung oder Hochfrequenzleistung ein,
15 die eine Beschleunigung von in dem induktiv gekoppelten
Plasma 14 erzeugten Ionen auf das Substrat 10 hin bewirkt.
Die in die Substratelektrode 11 eingekoppelte
Hochfrequenzleistung bzw. Wechselspannung liegt
typischerweise zwischen 3 Watt und 50 Watt bzw. 5 Volt und
20 100 Volt im Dauerstrichbetrieb bzw. bei gepulstem Betrieb
jeweils im Zeitmittel über die Pulssequenz.

Weiterhin ist ein ICP-Spulengenerator 17 vorgesehen, der mit
einem zweiten Impedanztransformator 18 und darüber mit der
ICP-Quelle 13 in Verbindung steht. Somit generiert die ICP-
Quelle 13 ein hochfrequentes elektromagnetisches Wechselfeld
25 und darüber in dem Reaktor 15 ein induktiv gekoppeltes
Plasma 14 aus Reaktiven Teilchen und elektrisch geladenen
Teilchen (Ionen), die durch Einwirken des hochfrequenten
30 elektromagnetischen Wechselfeldes auf das Reaktivgas
entstehen. Die ICP-Quelle 13 weist dazu eine Spule mit
mindestens einer Windung auf.

Der zweite Impedanztransformator 18 ist bevorzugt in der in
der Anmeldung DE 199 00 179.0 vorgeschlagenen Weise
ausgeführt, so daß eine balancierte, symmetrisch aufgebaute
Konfiguration und Speisung der ICP-Quelle 13 über den ICP-
Spulengenerator 17 gegeben ist. Damit wird insbesondere
gewährleistet, daß die an den beiden Enden der Spule der
ICP-Quelle 13 anliegenden hochfrequenten Wechselspannungen
zumindest nahezu gegenphasig zueinander sind. Weiter ist der
Mittelabgriff 26 der Spule der ICP-Quelle 13, wie in Figur 2
angedeutet, bevorzugt geerdet.

10 Mit der Plasmaätzanlage 5 wird weiter beispielsweise der aus
DE 42 41 045 C2 bekannte anisotrope Hochratenätzprozeß für
Silizium mit alternierenden Ätz- und Passivierschritten
15 durchgeführt. Hinsichtlich weiterer, dem Fachmann an sich
bekannter Details zu der Plasmaätzanlage 5, die insoweit als
bisher beschrieben aus dem Stand der Technik bekannt ist,
und des damit durchgeföhrten Ätzverfahrens, insbesondere

20 hinsichtlich der Reaktivgase, der Prozeßdrücke und der
Substratelektrodenspannungen in den jeweiligen Ätzschritten
bzw. Passivierschritten sei daher auf die DE 42 41 045 C2
verwiesen.

25 Die erfindungsgemäße Plasmaätzanlage 5 ist im übrigen auch
geeignet für eine Prozeßführung, wie sie in der Anmeldung DE
199 27 806.7 beschrieben ist.

Insbesondere wird beim Ätzen des Substrates 10 während der
Passivierschritte in dem Reaktor 15 mit einem Prozeßdruck
30 von 5 µbar bis 20 µbar und mit einer über die ICP-Quelle 13
in das Plasma 14 eingekoppelten mittleren Plasmaleistung von
300 bis 1000 Watt passiviert. Als Passiviergas eignet sich
beispielsweise C₄F₈ oder C₃F₆. Während der nachfolgenden
Ätzschritte wird dann ein Prozeßdruck von 30 µbar bis

50 μ bar und einer hohen mittleren Plasmaleistung von 1000 bis 5000 Watt geätzt. Als Reaktivgas eignet sich beispielsweise SF₆ oder ClF₃. Unter mittlerer Plasmaleistung wird dabei im Sinne der Erfindung stets eine zeitlich über eine Vielzahl von Plasmaleistungspulsen gemittelte eingekoppelte Plasmaleistung verstanden.

10 Weiterhin ist in der Plasmätszanlage 5 zwischen dem induktiv gekoppelten Plasma 14 bzw. der ICP-Quelle 13, d.h. der eigentlichen Plasmaerregungszone, und dem Substrat 10 ein sogenannter „Spacer“ als Distanzstück 22 aus einem nicht-ferromagnetischen Material wie beispielsweise Aluminium plaziert. Dieses Distanzstück 22 ist in die Wand des Reaktors 15 konzentrisch als Distanzring eingesetzt und bildet somit bereichsweise die Reaktorwand. Er hat eine typische Höhe von ca. 5 cm bis 30 cm bei einem typischen Durchmesser des Reaktors 15 von 30 cm bis 100 cm.

15
20 Das Distanzstück 22 wird in bevorzugter Ausgestaltung des Ausführungsbeispiels weiter von einer Magnetfeldspule 21 umgeben, die beispielsweise 100 bis 1000 Windungen aufweist und aus einem für die einzusetzende Stromstärke ausreichend dick bemessenen Kupferlackdraht gewickelt ist. Zusätzlich können Kupferrohre mit in die Magnetfeldspule 21 aufgenommen werden durch die Kühlwasser strömt, um Wärmeverluste aus der Magnetfeldspule 21 abzuführen.

25
30 Es ist alternativ auch möglich, die Magnetfeldspule 21 selbst aus einem dünnen, mit einem elektrisch isolierenden Material lackierten Kupferrohr zu wickeln, welches direkt von Kühlwasser durchströmt wird.

Durch die Magnetfeldspule 21 wird weiter über eine Stromversorgungseinheit 23 ein elektrischer Strom von beispielsweise 10 bis 100 Ampère geleitet.

5 Im erläuterten ersten Ausführungsbeispiel ist dies beispielsweise ein Gleichstrom, der im Inneren des Reaktors 15 ein statisches Magnetfeld erzeugt, das im Fall einer Magnetfeldspule 21 mit 100 Windungen und einer Länge von 10 cm sowie einem Durchmesser von 40 cm beispielsweise eine magnetische Feldstärke im Zentrum der Magnetfeldspule 21 von etwa 0,3 mTesla/A Stromfluß erzeugt.



10 Um eine signifikante Steigerung der Plasmaerzeugungseffizienz und eine ausreichende magnetische Führung des induktiv gekoppelten Plasmas 14 zu gewährleisten, werden Magnetfeldstärken von 10 mT bis 15 100 mT, beispielsweise 30 mT, benötigt. Das bedeutet, die Stromversorgungseinheit 23 stellt zumindest während der Ätzschritte zur Ätzung eines Substrates 10 Stromstärken von etwa 30 bis 100 Ampère bereit.



20 Anstelle der Magnetfeldspule 21 kann im übrigen auch ein Permanentmagnet eingesetzt werden. Ein derartiger Permanentmagnet benötigt vorteilhaft keine Energie, hat jedoch den Nachteil, daß eine Einstellung der Magnetfeldstärke, die zur Einstellung eines optimalen Ätzprozesses von Vorteil ist, nicht möglich ist. Überdies ist die Feldstärke eines Permanentmagneten temperaturabhängig, so daß die Magnetfeldspule 21 bevorzugt wird.

30

In jedem Fall ist wichtig, daß die Richtung des über die Magnetfeldspule 21 oder den Permanentmagneten erzeugten Magnetfeldes zumindest näherungsweise oder überwiegend parallel zu der durch die Verbindungsleitung von Substrat 10

und induktiv gekoppeltem Plasma 14 bzw. der Plasmaerregungszone definierten Richtung ist (longitudinale Magnetfeldorientierung).

5 Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erläuterten Ausführungsbeispiels sieht im übrigen vor, daß zur Uniformitätsverbesserung des Ätzprozesses eine aus der DE 197 34 278 bekannte Apertur im Inneren des Reaktors 15 konzentrisch zur Reaktorwand zwischen der ICP-Quelle 13 bzw. der Plasmaerregungszone und dem Substrat 10 angebracht wird. Diese Apertur ist in Figur 1 aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Bevorzugt ist sie ca. 5 cm oberhalb der Substratelektrode 11 oder des Substrates 10 an dem Distanzstück 22 („Spacer“) befestigt.

15 Zudem muß im Falle der Verwendung einer Magnetfeldspule 21 in die Stromversorgungseinheit 23 eine geeignete, an sich bekannte Überwachungsvorrichtung integriert sein, die in die Prozeßablaufsteuerung eingebunden ist und eine Überwachung der Spulentemperatur und eine Notabschaltung beispielsweise bei Kühlwasserausfall vornimmt.

20
25 Der ICP-Spulengenerator 17 koppelt weiter während der Ätzschritte und/oder während der Passivierschritte eine gepulste Plasmaleistung in das induktiv gekoppelte Plasma 14 ein, die im zeitlichen Mittel zwischen minimal 300 Watt bis maximal 5000 Watt liegt. Bevorzugt werden während der Ätzschritte im zeitlichen Mittel 2000 Watt und während der Passivierschritte 500 Watt eingekoppelt.

30 Um das Pulsen der eingekoppelten Plasmaleistung zu ermöglichen ist weiter vorgesehen, daß während des Pulses ständig eine Anpassung der Impedanz der über den ICP-Spulengenerator 17 erzeugten Hochfrequenzleistung an die

5

sich mit verändernder d.h. gepulster Plasmaleistung verändernde Plasmaimpedanz vorgenommen wird. Dazu wird die Frequenz des hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeldes, das der ICP-Spulengenerator 17 erzeugt, zur Impedanzanpassung innerhalb einer vorgegebenen Bandbreite variiert.

10

15

Im einzelnen ist dazu das bevorzugt symmetrisch aufgebaute und die ICP-Quelle 13 symmetrisch speisende Anpaßnetzwerk in dem zweiten Impedanztransformator 18 zunächst so eingestellt, daß eine möglichst optimale Impedanzanpassung stets dann gegeben ist, wenn die eingekoppelten Hochfrequenzplasmaleistungspulse ihre Maximalwerte erreicht haben. Typische Maximalwerte der Hochfrequenzplasmaleistungspulse liegen dabei zwischen 3 kWatt und 20 kWatt bei einem Puls-zu-Pause-Verhältnis von 1:1 bis 1:10.

20

25

Weiterhin ist vorgesehen, daß die Frequenzvariation des eingekoppelten elektromagnetischen Wechselfeldes derart erfolgt, daß mit dem Erreichen der Maximalwerte der Hochfrequenzplasmaleistungspulse gleichzeitig die Stationär- oder Resonanzfrequenz $1''$ des von dem ICP-Spulengenerator 17 erzeugten hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfelds erreicht ist. Die Stationärfrequenz $1''$ beträgt dabei bevorzugt 13,56 MHz.

30

Die Variation der Frequenz des elektromagnetischen Wechselfeldes um die Stationärfrequenz $1''$ beim Pulsen der Plasmaleistung wird vorgenommen, um zu gewährleisten, daß beim Pulsen der Plasmaleistung stets eine zumindest weitgehende Anpassung der Impedanz der erzeugten Hochfrequenzleistung bzw. des ICP-Spulengenerators 17 an die jeweilige, sich zeitlich als Funktion der Plasmaleistung

ändernde Impedanz des Plasmas 14 gegeben ist. Dazu wird die Frequenz des ICP-Spulengenerators 17 innerhalb einer gewissen Bandbreite um die Stationärfrequenz $1''$ freigegeben und durch eine Regelelektronik zur Impedanzanpassung innerhalb dieser Bandbreite variiert.

5

Diese Frequenzvariation wird mit Hilfe der Figur 3 erläutert, in der eine Filterkennlinie $1'$ dargestellt ist, die einen voreingestellten Frequenzbereich (Bandbreite) vorgibt, innerhalb dessen die Frequenz des ICP-Spulengenerators 17 variiert wird, wobei jeder Frequenz eine gewisse Hochfrequenzleistung bzw. einzukoppelnde Plasmaleistung oder eine Dämpfung A der Leistung des ICP-Spulengenerators 17 zugeordnet ist. Die zu erreichende Frequenz im stationären Leistungsfall ist dabei die Stationärfrequenz $1''$, die zumindest näherungsweise jeweils dann vorliegt, wenn während eines Plasmaleistungspulses die jeweilige Maximalleistung des Pulses erreicht ist.

10

Weitere Details einer geeigneten elektronischen Schaltung zur Impedanzanpassung durch Frequenzvariation in Form eines selbsttätig wirkenden Rückkopplungskreises werden mit Hilfe der Figur 2 erläutert. Dabei wird zunächst die ICP-Quelle 13, d.h. konkret deren Spule, zunächst in an sich aus DE 199 00 179 bekannter Weise durch ein vorzugsweise balanciertes symmetrisches Anpaßnetzwerk 2 aus einem unbalancierten unsymmetrischen Ausgang des ICP-Spulengenerators 17

15

gespeist. Das Anpaßnetzwerk 2 ist dabei Teil des zweiten Impedanztransformators 18. Der ICP-Spulengenerator 17 weist weiter einen Hochfrequenz-Leistungsverstärker 3 und einen Quarzoszillatator 4 zur Erzeugung einer hochfrequenten Grundschwingung mit fester Frequenz von beispielsweise 13,56 MHz auf.

20

25

Die hochfrequente Grundschwingung des Quarzoszillators 4 wird im Stand der Technik normalerweise in den Verstärkereingang des Leistungsverstärkers 3 eingespeist. Diese Einspeisung jedoch zunächst dahingehend modifiziert, daß der Quarzoszillator 4 vom Verstärkereingang des Leistungsverstärkers 3 zumindest während der Leistungsänderungsphasen getrennt und dessen Eingang extern, beispielsweise über eine entsprechende Eingangsbuchse, zugänglich gemacht wird. Da der Quarzoszillator 4 in dieser Ausführungsform keine Funktion mehr besitzt, kann er auch geeignet deaktiviert werden.

Es ist im übrigen auch möglich, den Quarzoszillator 4 im stationären Fall, d.h. nach Abschluß einer

Leistungsvariation, wieder auf den Verstärkereingang zu schalten und den externen Rückkoppelungskreis zu trennen. Damit erfolgt ein elektrisch sehr schnell mögliches Umschalten zwischen internem Oszillatator und externem

Rückkoppelungskreis, je nachdem ob die

Generatorausgangsleistung gerade stationär oder in Veränderung begriffen ist.

Der Leistungsverstärker 3 besitzt weiter in bekannter Weise Generatorsteuereingänge 9, die zur externen Steuerung des ICP-Spulengenerators 17 dienen. Darüber ist beispielsweise ein Ein- und Ausschalten des ICP-Spulengenerators 17 oder die Vorgabe einer zu erzeugenden Hochfrequenzleistung zur

Einkopplung in das Plasma 14 möglich. Außerdem sind

Generatorstatusausgänge 9' zur Rückmeldung von

Generatordaten, wie beispielsweise Generatorstatus, gegenwärtige Ausgangsleistung, reflektierte Leistung, Überlast usw., an ein nicht dargestelltes externes Steuergerät (Maschinensteuerung) oder die Stromversorgungseinheit 23 der Plasmaätzanlage 5 vorgesehen.

Der Verstärkereingang des Leistungsverstärkers 3 wird nun im Sinne einer Rückkopplungsschaltung zumindest zeitweise, d.h. während Leistungsänderungsphasen, über ein

5 frequenzselektives Bauteil 1 mit der ICP-Quelle 13 verbunden. Dabei können zusätzlich Kondensatoren, Induktivitäten und Widerstände oder Kombinationen aus derselben in an sich bekannter Weise als Spannungsteiler verschaltet und vorgesehen sein, um die hohen Spannungen, die an der Spule der ICP-Quelle 13 auftreten, auf ein als Eingangsgröße für das frequenzselektive Bauteil 1 bzw. den Verstärkereingang des Leistungsverstärkers 3 geeignetes Maß abzuschwächen. Solche Spannungsteiler sind Stand der Technik und sind in der Figur 2 lediglich durch einen

10 Auskoppelkondensator 24 zwischen der Spule der ICP-Quelle 13 d.h. einem Signalabgriff 25 und dem frequenzselektivem Bauteil 1 angedeutet. Man kann übrigens den Signalabgriff 25 alternativ auch in die Nähe des eingezeichneten geerdeten Mittelpunkts oder Mittelabgriffes 26 der Spule der ICP-
15 Quelle 13 verlegen, wo entsprechend geringere Spannungspegel herrschen. Je nach Abstand des Signalabgriffs 25, der beispielsweise als verstellbarer Klemmkontakt ausgeführt sein kann, vom geerdeten Mittelabgriff 26 der Spule der ICP-Quelle 13 kann eine größere oder kleinere abgegriffene Spannung eingestellt und somit günstige Pegelverhältnisse
20 erreicht werden.

25

Das frequenzselektive Bauteil 1 ist exemplarisch als abstimmbare Anordnung von Spulen und Kondensatoren, sogenannten LC-Resonanzkreisen dargestellt, welche zusammen ein Bandfilter bilden. Dieses Bandfilter hat als Durchlaßbereich eine gewisse vorgegebene Bandbreite von beispielsweise 0,1 MHz bis 4 MHz und eine Filterkennlinie 1', wie sie schematisch in Figur 3 dargestellt ist.

Insbesondere weist das Bandfilter eine Resonanz- oder
Stationärfrequenz f_0 mit maximaler Signaltransmission auf.
Diese Stationärfrequenz f_0 beträgt im erläuterten Beispiel
13,56 MHz und kann insbesondere durch einen Schwingquarz 6
oder ein Piezokeramikfilterelement als zusätzlicher
Komponente des Bandfilters exakt festgelegt werden. Es ist
im übrigen auch möglich, anstelle von LC-Resonanzkreisen
sogenannte piezokeramische Filterelemente oder andere, an
sich bekannte frequenzselektive Bauelemente zu einem
Bandfilter mit einer gewünschten Filterkennlinie, Bandbreite
und Stationärfrequenz f_0 zu kombinieren.

Die vorstehend beschriebene Anordnung aus geregeltem
Leistungsverstärker 3, Anpaßnetzwerk 2, ICP-Quelle 13 und
Bandfilter stellt insgesamt eine Rückkopplungsschaltung nach
Art eines Meißner'schen Oszillators dar. Dieser schwingt bei
Betrieb zunächst in der Nähe der Stationärfrequenz f_0 an,
um sich auf eine vorgegebene Ausgangsleistung des Lei-

stungsverstärkers 3 aufzuschaukeln. Die für das Anschwingen
erforderliche Phasenbeziehung zwischen Generatiorausgang und
Signalabgriff 25 wird dazu vorher einmalig, beispielsweise
über eine Verzögerungsleitung 7 definierter Länge und damit
über eine durch die Signallaufzeit definierte
Phasenverschiebung oder einen an sich bekannten
Phasenschieber anstelle der Verzögerungsleitung 7,
eingestellt. Damit ist stets gewährleistet, daß die Spule
der ICP-Quelle 13 mit einer korrekten Phase optimal
entdämpft wird.

Über die Verzögerungsleitung 7 wird weiter sichergestellt,
daß am Ort der ICP-Quelle 13 die antreibende elektrische
Spannung und der Strom in der Spule der ICP-Quelle 13 eine
Resonanzphase von ungefähr 90° zueinander aufweisen.

In der Praxis ist im übrigen die Resonanzbedingung der Rückkopplungsschaltung über das frequenzselektive Bauteil 1 nicht scharf, so daß vielfach eine geringe Frequenzverschiebung in der Umgebung der Resonanz- oder
5 Stationärfrequenz f_1 ausreicht, um die Resonanzbedingung hinsichtlich der Phase quasi selbsttätig richtigzustellen. Daher ist es ausreichend, die Resonanzbedingung durch die äußere Beschaltung nur ungefähr richtigzustellen, damit der Resonanzkreis irgendwo in der unmittelbaren Umgebung seiner
10 Stationärfrequenz f_1 aufschwingt.

Sollten sich jedoch alle Phasenverschiebungen vom
Signalabgriff 25 der Spule der ICP-Quelle 13 über das
Bandfilter in den Eingang des Leistungsverstärkers 3 und
15 durch den Leistungsverstärker zum zweiten
Impedanztransformator 18 zurück in die Spule der ICP-Quelle
13 so ungünstig aufsummieren, daß gerade eine Bedämpfung
statt einer Entdämpfung des Resonanzkreises stattfindet, so
kann das System nicht anschwingen. Die Rückkopplung wird
20 dann zu einer unerwünschten Gegenkopplung anstelle der
gewünschten Mitkopplung. Die Einstellung dieser zumindest
näherungsweise korrekten Phase leistet die Ver-
zögerungsleitung 7, deren Länge daher einmalig für die
Plasmaätzanlage 5 so einzustellen ist, daß die Rückkopplung
25 konstruktiv, also entdämpfend wirkt.

Insgesamt kann im Fall einer Fehlanpassung an die
Plasmaimpedanz, beispielsweise während schneller
Leistungsänderungen, der erläuterte Rückkopplungskreis
30 innerhalb des Durchlaßbereiches des Bandfilters in seiner
Frequenz ausweichen und somit stets eine weitgehend optimale
Impedanzanpassung auch bei schnellen Impedanzänderungen des
induktiv gekoppelten Plasmas 14 aufrechterhalten. Während
solcher schneller Leistungsänderungen ist der erläuterte

Rückkoppelungskreis stets aktiviert und der interne
Oszillator 4 des Generators 17 deaktiviert.

5 Sobald sich das induktiv gekoppelte Plasma 14 dann
hinsichtlich der Plasm impedanz bzw. der eingekoppelten
Plasmaleistung stabilisiert, wird die Frequenz des ICP-
Spulengenerators 17 in die Nähe oder auf den Wert der
maximalen Durchlaßfrequenz zurückkehren, die durch die
Stationärfrequenz 1'' gegeben ist. Diese Anpassung der
10 Impedanz durch Frequenzvariation geschieht selbsttätig und
sehr schnell innerhalb weniger Schwingungsperioden der
hochfrequenten, vom ICP-Spulengenerator erzeugten
Wechselspannung d.h. im Mikrosekundenbereich.

15 Die Verbindung zwischen dem Ausgang des Leistungsverstärkers
3 und dem Eingang des zweiten Impedanztransformators 18
leistet im übrigen die Leitung 8, die als Koaxialkabel
ausgebildet und in der Lage ist, eine Leistung von einigen
kWatt zu tragen.

20 Um nun eine gepulste Plasmaleistung in das induktiv
gekoppelte Plasma einzukoppeln wird die Ausgangsleistung des
ICP-Spulengenerators 17 beispielsweise periodisch mit einer
Wiederholfrequenz von typischerweise 10 Hz bis 1 MHz,
bevorzugt 10 kHz bis 100 kHz ein- und ausgeschaltet d.h.
25 gepulst.

30 Alternativ kann auch die Hüllkurve der Ausgangsspannung des
ICP-Spulengenerators 17 mit einer geeigneten
Modulationsspannung in ihrer Amplitude moduliert werden.
Derartige Vorrichtungen zur Amplitudenmodulation sind aus
der Hochfrequenztechnik hinlänglich bekannt. Dazu wird
beispielsweise der Generatorsteuereingang 9 zur
Sollwertvorgabe der Hochfrequenzleistung des ICP-

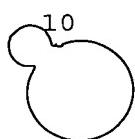
Spulengenerators 17 verwendet, um damit das die Hochfrequenzleistung des ICP-Spulengenerators 17 modulierende Signal einzuspeisen.

5 Selbstverständlich müssen der ICP-Spulengenerator 17 und die übrigen betroffenen Komponenten der Plasmaätzanlage 5 beim Pulsen der Plasmaleistung so ausgelegt werden, daß sie auch die auftretenden Spitzenbelastungen (Strom- und Spannungsspitzen) ohne Schaden verarbeiten können. Aufgrund
10 der hohen Spannungsspitzen an der induktiven Spule wirkt sich hierbei die balancierte Speisung der ICP-Quelle 13 besonders vorteilhaft auf den Erhalt günstiger Plasmaeigenschaften aus.

15 Typische Puls-zu-Pause-Verhältnisse, d.h. das Verhältnis der Zeitdauer der Pulse zu der Zeitdauer der Pulspausen, bei dem erläuterten Plasmaätzprozeß mit gepulster Plasmaleistung liegen im übrigen zwischen 1:1 und 1:100. Die Amplitude der einzelnen Hochfrequenzleistungspulse zur Erzeugung der
20 Plasmaleistungspulse liegt zweckmäßig zwischen 500 Watt und 20.000 Watt, bevorzugt bei ca. 10.000 Watt, wobei die Einstellung der mittleren Plasmaleistung beispielsweise durch eine Einstellung des Puls-zu-Pause-Verhältnisses vorgenommen wird.

25 Ein weiteres Ausführungsbeispiel sieht in Weiterführung des vorstehend erläuterten Ausführungsbeispiels vor, daß das
 über die Magnetfeldspule 21 erzeugte Magnetfeld nunmehr ebenfalls gepulst wird. Dabei sei jedoch betont, daß der
30 Einsatz eines konstanten oder gepulsten Magnetfeldes zwar vorteilhaft für das erfindungsgemäße Verfahren zur Plasmaätzung mit Plasmaleistungspulsen, jedoch nicht zwingend ist. Je nach Einzelfall kann auf ein zusätzliches Magnetfeld auch verzichtet werden.

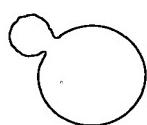
Besonders bevorzugt erfolgt die Pulsung des Magnetfeldes,
die in einfacher Weise über entsprechende von der
Stromversorgungseinheit 23 erzeugte Strompulse hervorgerufen
wird, derart, daß das Magnetfeld nur dann erzeugt wird, wenn
gleichzeitig auch ein Hochfrequenzleistungspuls zur
Erzeugung bzw. Einkopplung von Plasmaleistung in das
induktiv gekoppelte Plasma 14 an der ICP-Quelle 13 ansteht.
Solange keine Plasmaleistung eingekoppelt oder kein Plasma
angeregt wird, ist in der Regel auch keine
Magnetfeldunterstützung erforderlich.



Eine derartige zeitliche Synchronisation von
Hochfrequenzleistungspulsen zur Einkopplung von
Plasmaleistung in das Plasma 14 und Strompulsen durch die
Magnetfeldspule 21 wird mit Hilfe der Figur 4 erläutert.
Dabei wird der Spulenstrom durch die Magnetfeldspule 21
jeweils kurz vor einem Hochfrequenzleistungspuls

eingeschaltet und kurz nach dem Ende dieses Pulses wieder
ausgeschaltet. Die zeitliche Synchronisation der Strom- bzw.
Plasmaleistungspulse kann dabei in einfacher Weise durch
einen beispielsweise in die Stromversorgungseinheit 23
integrierten, an sich bekannten Pulsgeber gewährleistet
werden, der mit zusätzlichen Zeitgliedern versehen ist, um
den Plasmaleistungspuls mit einer gewissen Verzögerung von
beispielsweise 10 % der eingestellten

Hochfrequenzimpulsdauer nach dem Einschalten des Stroms der
Magnetfeldspule 21 aufzuschalten bzw. diesen Strom mit einer
gewissen Verzögerung von beispielsweise 10 % der
eingestellten Hochfrequenzimpulsdauer nach dem Ende des
Plasmaleistungspulses wieder auszuschalten. Dazu ist weiter
auch eine Verbindung von Stromversorgungseinheit 23 und ICP-
Spulengenerator 17 vorgesehen. Solche Synchro-
nisationsschaltungen und entsprechende Zeitglieder zur



Herstellung der benötigten Zeitverzögerungen sind Stand der
Technik und allgemein bekannt. Dazu ist die
Stromversorgungseinheit 23 weiter mit dem ICP-
Spulengenerator 17 in Verbindung. Im übrigen sei betont, daß
5 die Dauer eines Strompulses durch die Magnetfeldspule 21
vorteilhaft stets etwas länger als die Dauer eines
Plasmaleistungspulses ist.

10 Typische Wiederholraten oder Pulsraten orientieren sich an
der Induktivität der Magnetfeldspule 21, die die
Änderungsgeschwindigkeit des Spulenstroms begrenzt. Eine
Wiederholrate von einigen 10 Hz bis 10 kHz ist, abhängig von
deren Geometrie, für die meisten Magnetfeldsspulen 21
realistisch. Typische Puls-zu-Pause-Verhältnisse für die
15 Plasmaleistungspulse liegen zwischen 1:1 und 1:100.

20 In diesem Zusammenhang ist weiter vorgesehen, die aus DE 197
34 278.7 bekannte und bereits vorstehend erläuterte Apertur
unterhalb der Magnetfeldspule 21 einige cm über dem Substrat
10 oder der Substratelektrode 11, die das Substrat 10 trägt,
einzusetzen. Durch diese Apertur verbessert sich einerseits
die Uniformität der Ätzung über die Substratoberfläche
insbesondere mit einer symmetrisch gespeisten ICP-Quelle 13
deutlich. Gleichzeitig reduziert sie auch das zeitvariable
25 Magnetfeld - die Transienten - am Ort des Substrates 10.
Dabei führen Wirbelströme in dem Aperturring der Apertur zu
einer Bedämpfung der zeitvariablen Magnetfeldanteile
unmittelbar vor dem Substrat 10, so daß Induktionsvorgänge
auf dem Substrat 10 selbst abgeschwächt werden.

30 Derartige sich ändernde Magnetfelder, sogenannte
Transienten, könnten an Antennenstrukturen auf dem Substrat
10 Spannungen induzieren, die ihrerseits wieder zu
Schädigungen des Substrates 10 führen können, wenn dieses

beispielsweise integrierte Schaltkreise oder insbesondere
Feldeffekttransistoren aufweist.

Ein weiteres Ausführungsbeispiel sieht in Weiterführung der
5 vorstehenden Ausführungsbeispiele vor, daß neben der Pulsung
der Plasmaleistung über den ICP-Spulengenerator,
gegebenenfalls wie vorstehend erläutert unter gleichzeitigem
Einsatz eines zeitlich konstanten oder gepulsten
Magnetfeldes, nun auch die über die Substratelektrode 11 an
dem Substrat 10 anliegende, von dem
10 Substratspannungsgenerator 12 erzeugte Hochfrequenzleistung.
gepulst wird, und daß diese Pulsungen von Plasmaleistung und
Substratspannung oder von Plasmaleistung, Substratspannung
und Magnetfeld insbesondere miteinander synchronisiert
werden.

15

Im einzelnen erfolgt die Pulsung der in die
Substratelektrode 11 eingekoppelten gepulsten

20 Hochfrequenzleistung bevorzugt derart, daß über den
Substratspannungsgenerator 12 nur während der Dauer der über
den ICP-Spulengenerator 17 erzeugten Plasmaleistungspulse
eine Hochfrequenzleistung in das Substrat 10 eingekoppelt
wird. Dazu werden beispielsweise ein oder mehrere
Hochfrequenzleistungspulse mit dem
25 Substratspannungsgenerator 12 während eines
Plasmaleistungspulses, also bei maximaler Plasmadichte an
positiv geladenen Ionen und Elektronen, eingesetzt.

30 Alternativ kann die Pulsung der in die Substratelektrode 11
eingekoppelten Hochfrequenzleistung jedoch auch derart
erfolgen, daß ein oder mehrere
Substratspannungsgeneratorpulse nur während der Impulspausen
der Plasmaleistungspulse angelegt werden. In diesem Fall
wird die über den Substratspannungsgenerator eingekoppelte

Hochfrequenzleistung gerade dann eingekoppelt, wenn die Plasmaerzeugung nicht aktiv ist, also bei minimaler Dichte an positiv geladenen Ionen und Elektronen, aber maximaler Dichte an negativ geladenen Ionen, sogenannten Anionen,
5 welche aus der Rekombination von Elektronen und Neutralteilchen in den Anregungspausen im zusammenbrechenden Plasma entstehen. Diese Zeitphasen eines gerade abgeschalteten Plasmas, das sogenannte "afterglow regime", d.h. die "Nachleuchtpause" des gerade abgeschalteten Plasmas, werden durch Rekombinationsprozesse von Elektronen und positiv geladenen Ionen oder Neutralteilchen dominiert.
10 Wenn in dieser Nachleuchtpause die Substratelektrodenleistung in Form von einem oder mehreren Pulsen aktiviert wird, führt dies auf dem zu bearbeitenden Substrat 10 bei gewissen Anwendungen, wie beispielsweise im Fall eines Ätzstopps auf einem vergrabenem Dielektrikum wie SiO₂, bei gleichzeitig hohen Aspektverhältnisses der erzeugten Trenchgräben, zu wünschenswerten Wafereffekten, die insbesondere durch das vermehrte Einwirken von negativ geladenen Ionen hervorgerufen werden, die ansonsten bei
15 Plasmaätzprozessen praktisch keine Rolle spielen. Eine in diesem Zusammenhang besonders vorteilhafte, spezielle Ausführung dieser zeitlichen Korrelation von
20 Plasmaleistungspulsen und in die Substratelektrode 11 eingekoppelten Hochfrequenzleistungspulsen ist dadurch gegeben, daß die Plasmaerzeugung im wesentlichen im
25 ~~Dauerstrich stattfindet und jeweils nur kurzzeitig~~

abgeschaltet wird, um innerhalb dieser kurzen Abschaltpausen des ICP-Spulengenerators 17 einen Hochfrequenzleistungspuls über den Substratspannungsgenerator 12 in das Substrat 10 einzukoppeln. Insgesamt unterbricht man damit periodisch kurzzeitig mit der Wiederholfrequenz des Erscheinens der Substratspannungsgeneratorpulse den ICP-Spulengenerator 17 für eine Zeitdauer, die länger, insbesondere geringfügig
30

länger als die Pulsdauer des Substratspannungsgeneratorpulses ist. Das Puls-zu-Pause-Verhältnis des ICP-Spulengenerators 17 beträgt in diesem Fall typischerweise 1:1 bis 20:1.

5

Je nach konkretem Ätzprozeß bestehen eine Vielzahl von weiteren Möglichkeiten der zeitlichen Synchronisation oder Korrelation von über den Substratspannungsgenerator 12 in das Substrat 10 eingekoppelten Hochfrequenzleistungspulsen und in das induktiv gekoppelte Plasma 14 eingekoppelten Plasmaleistungspulsen. So können die Substratspannungsgeneratorpulse sowohl während der Plasmaleistungspulse als auch während der Plasmaleistungspausen eingekoppelt werden d.h. es wird beispielsweise während eines Plasmaleistungspulses jeweils ein Substratspannungsgeneratorpuls und während einer Plasmaleistungspause jeweils ein weiterer Substratspannungsgeneratorpuls gesetzt. Die Verhältnisse der Pulsanzahlen des Substratspannungsgenerators 12 in den Phasen "Plasma an" und "Plasma aus" können dabei im Einzelfall weitgehend frei gewählt werden.

10

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Substratspannungsgeneratorpulse nur während abfallender und/oder ansteigender Impulsflanken der Plasmaleistungspulse einzusetzen d.h. bei beginnender "Afterglow-Phase" oder beim Hochlaufen der Plasmaerzeugung. Die jeweils optimale zeitliche Korrelation von Plasmaleistungspulsen und Substratspannungsgeneratorpulsen muß dabei vom Fachmann im Einzelfall für den jeweiligen Ätzprozeß oder das jeweils geätzte Substrat anhand von einfachen Testätzungen ermittelt werden.

15

20

25

30

Ganz besonders bevorzugt erfolgt die zeitliche Synchronisation oder Korrelation der über den Substratspannungsgenerator 17 in das Substrat 10 eingekoppelten Hochfrequenzleistungspulse mit den Plasmaleistungspulsen derart, daß die Pulsdauer der Hochfrequenzleistungspulse so kurz eingestellt wird, daß ein Einzelpuls jeweils nur wenige Schwingungsperioden, insbesondere weniger als 10 Schwingungsperioden, der hochfrequenten Grundschwingung der im Substratspannungsgenerator erzeugten hochfrequenten Wechselspannung andauert.

10 Im einzelnen wird dazu beispielsweise eine Frequenz von 13,56 MHz für die Grundschwingung der in das Substrat einzukoppelnden Hochfrequenzleistungspulse benutzt, so daß die Dauer einer Schwingungsperiode der hochfrequenten Grundschwingung ca. 74 ns beträgt. Im Fall von 10 Schwingungsperioden ergibt sich somit eine Pulsdauer der Substratspannungsgeneratorpulse von lediglich 740 ns. Somit wird bei einer Wiederholfrequenz der Einzelimpulse der Substratspannungsgeneratorpulse von beispielsweise 200 kHz, entsprechend einem Pulsabstand von 5000 ns, und einer Pulslänge von beispielsweise 500 ns, d.h. ungefähr 7 Schwingungsperioden der hochfrequenten Grundschwingung von 13,56 MHz, ein Puls-zu-Pause-Verhältnis von 1:9 eingestellt.

15 Zur Erreichung einer im zeitlichen Mittel ca. 20 Watt großen, in das Substrat 10 eingekoppelten

20 Hochfrequenzleistung ist demnach eine Maximalleistung der Substratspannungsgeneratorpulse von 200 Watt erforderlich,

25 die über entsprechend große Hochfrequenzamplituden erhalten wird.

30 Die Maximalleistung der einzelnen Substratspannungsgeneratorpulse kann jedoch auch weitaus geringer oder weitaus höher sein und beispielsweise bis zu

1200 Watt erreichen. Die im zeitlichen Mittel in das Substrat 10 eingekoppelte Hochfrequenzleistung beträgt im erläuterten Beispiel dann jeweils ein Zehntel des jeweiligen Maximalwertes der Einzelpulse.

5

Als Parameter zur Einstellung der im zeitlichen Mittel in das Substrat 10 eingekoppelten Hochfrequenzleistung steht somit neben der Wahl des Puls-zu-Pause-Verhältnisses auch der Maximalwert der Leistung eines einzelnen

10 Substratspannungsgeneratorpulses zur Verfügung. Daher kann entweder die Maximalleistung während der Substratspannungsgeneratorpulse auf einen festen Wert von beispielsweise 1 kWatt festgelegt und das Puls-zu-Pause-Verhältnis so geregelt werden, daß ein voreingestellter 15 zeitlicher Mittelwert der Hochfrequenzleistung in das Substrat 10 eingekoppelt wird, oder umgekehrt das Puls-zu-Pause-Verhältnis fest eingestellt werden und die Maximalleistung während der Substratspannungsgeneratorpulse

20 entsprechend so geregelt werden, daß dieser zeitliche Leistungsmittelwert erreicht wird.

Zur Realisierung dieser Regelung wird beispielsweise eine Sollwertvorgabe der in das Substrat 10 einzukoppelnden Hochfrequenzleistung der Maschinensteuerung der Plasmaätzanlage 5 als analoge Spannungsgröße in eine Wiederholfrequenz von Einzelimpulsen umgesetzt, so daß die vom Substratspannungsgenerator 12 abgegebene, und an die

25 Maschinensteuerung rückgemeldete Durchschrittsleistung als zeitlicher Mittelwert genau der Sollwertvorgabe entspricht.

30 Zur Übersetzung einer analogen Spannungsvorgabe in eine Frequenz werden dazu an sich bekannte, sogenannte U/f-Wandlerbausteine (Spannungs/Frequenzwandler) bzw. VCO's („Voltage Controlled Oscillator“) eingesetzt.

Die Erzeugung von Hochfrequenzpulsen im angegebenen Kurzzeitbereich mit dem Substratspannungsgenerator 12 ist an sich technisch relativ unproblematisch, da Hochfrequenzgeneratoren kommerziell erhältlich sind, die eine Anstiegs- und Abfallzeit von 30 ns aufweisen und Pulsdauern von 100 ns bei Spitzenleistungen bis hin zu mehreren Kilowatt bewältigen können.

Die erläuterten, in das Substrat 10 eingekoppelten und mit dem Substratspannungsgenerator 12 erzeugten Hochfrequenzleistungspulse im Bereich einiger hundert Nanosekunden werden im übrigen zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit bevorzugt derart erzeugt, daß das hochfrequente Signal innerhalb eines Einzelimpulses immer gleich aussieht. Dazu werden für einen Einzelimpuls beispielsweise immer drei volle hochfrequente Schwingungsperioden der 13,56 MHz Grundschwingung so herausgeschnitten, daß der hochfrequente Signalverlauf zu Beginn jedes Einzelimpulses jeweils mit einem Nulldurchgang und einem ansteigenden Sinus beginnt und zum Ende des Einzelimpulses jeweils mit einem Nulldurchgang und ebenfalls einem ansteigenden Sinus endet.

Diese Synchronisation von Einzelimpulsverlauf und Verlauf der hochfrequenten Grundschwingung kann alternativ auch derart erfolgen, daß zu Beginn eines Einzelimpulses gerade eine positive Sinushalbwelle der hochfrequenten

Grundschwingung beginnt und zum Ende eines Einzelimpulses gerade eine positive Halbwelle endet, d.h. der Einzelimpuls umfaßt eine um 1 größere Zahl von positiven Sinushalbwellen als negative Sinushalbwellen. Umgekehrt kann durch entsprechende Synchronisation unter sonst gleichen Verhältnissen auch eine um 1 größere Zahl von negativen Sinushalbwellen als positiven Sinushalbwellen in einen

Einzelimpuls gelegt werden, indem der Einzelimpuls mit einer negativen Sinushalbwelle des hochfrequenten Signals beginnt und endet.

5 Ohne die erläuterte Synchronisation könnte die Zahl positiver und negativer Sinushalbwellen in den erzeugten Hochfrequenzpulsen unterschiedlich ausfallen, wobei in Grenzfällen Unterschiede von bis zu zwei Sinushalbwellen möglich wären. Dies führte besonders bei einer nur geringen
10 Anzahl von Schwingungsperioden innerhalb eines über den Substratspannungsgenerator 17 erzeugten Hochfrequenzpulses zu stochastischen Abweichungen der Signalverläufe der Einzelpulse und insbesondere zu langsam fluktuierenden Verhältnissen hinsichtlich der Anzahl der positiven und
15 negativen Sinushalbwellen, was die Reproduzierbarkeit des gesamten Ätzprozesses negativ beeinflußt.

Um zu gewährleisten, daß immer der gleiche hochfrequente Spannungsverlauf innerhalb eines Einzelimpulses des

20 Substratspannungsgenerators 12 vorliegt, wird daher zur Synchronisation der Einzelimpulse mit der hochfrequenten Grundschwingung bevorzugt die mit Hilfe der Figur 5 erläuterte elektronische Schaltung in diesem Ausführungsbeispiel zusätzlich mit dem
25 Substratspannungsgenerator 12 integriert ausgeführt.

Im einzelnen sieht die Schaltung gemäß Figur 5 zunächst eine Steuervorrichtung 32 mit einem integrierten Frequenzgenerator vor, der ein Rechtecksignal mit der Frequenz vorgibt, mit der die Einzelimpulse in das Substrat 10 eingekoppelt werden sollen, beispielsweise 200 kHz. Diese Wiederholfrequenz kann jedoch alternativ auch - bei fest vgewählter Impulsspitzenleistung des Substratspannungsgenerators 12 - aus der Sollwertvorgabe

einer Durchschnittsleistung der Anlagensteuerung der
Plasmaätzanlage 5 so abgeleitet werden, daß die vom
Substratspannungsgenerator 12 in Form von Einzelimpulsen
abgegebene und an die Maschinensteuerung rückgemeldete
Durchschnittsleistung der als Sollwert vorgegebenen
Durchschnittsleistung entspricht, was beispielsweise durch
eine einfache Spannungs-Frequenzwandlung mit entsprechender
Kalibrierung erreicht wird.

10 Die Rechteckausgangsspannung des Frequenzgenerators der
Steuervorrichtung 32 wird im weiteren dann zunächst in einer
an sich bekannten U/f-Wandlervorrichtung 34 in eine
zugeordnete Frequenz gewandelt und gleichzeitig an den D-
Eingang und den Clear-Eingang (CLR-Eingang) eines D-
15 Flipflops 35 angelegt. Damit bleibt das D-Flipflop 35
solange gelöscht (0-Pegel an Clear) und kann auch nicht
gesetzt werden (0-Pegel an D-Eingang), solange die
Rechteckspannung einen 0-Pegel aufweist.

20 Am Takteingang des D-Flipflops 35 liegt weiter über einen
einstellbaren Phasenschieber 30 eine unter Umständen
geeignet aufbereitete Oszillatormspannung eines
Hochfrequenzgenerators 31 an, der eine hochfrequente
Wechselspannung von beispielsweise 13,56 MHz erzeugt. Dieser
25 Ausgang wird bei kommerziell verfügbaren HF-Generatoren als
CEX-Ausgang bezeichnet („Common Exciter“).

30 Sobald nun das Rechtecksignal des Frequenzgenerators von 0
auf 1 gewechselt hat, wird das D-Flipflop 35 jedesmal von
der nächsten, darauffolgenden positiven Sinushalbwelle der
hochfrequenten Wechselspannung des HF-Generators 31 gesetzt
und bleibt solange gesetzt, bis das Rechtecksignal des
Frequenzgenerators wieder von 1 auf 0 zurückschaltet und

über den Clear-Eingang das D-Flipflop 35 mittels 0-Pegel zurücksetzt.

Der Ausgang des D-Flipflops 35 ist weiter so mit dem
5 Takteingang eines Monoflops 33 verbunden, daß das Monoflop
33 gleichzeitig mit dem Setzen des D-Flipflops 35 einen
Einzelimpuls abgibt, dessen Impulsdauer über eine in das
Monoflop 33 integrierte Widerstands-Kondensator-Kombination
weitgehend frei, insbesondere sehr kurz d.h. kleiner als
100 ns gewählt werden kann. Dieser Einzelimpuls des
Monoflops 33 wird dem Pulseingang des Hochfrequenzgenerators
31 zugeführt und veranlaßt diesen, während der Dauer des
angelegten Einzelimpulses am Generatortaustgang 36 einen
hochfrequenten Ausgangsimpuls, d.h. ein aus wenigen
15 hochfrequenten Schwingungsperioden bestehendes
Spannungspaket abzugeben. Damit ist das Ausgangssignal am
Generatortaustgang 36 stets synchron zu der hochfrequenten
Grundschwingung des internen Hochfrequenzgenerators 31, so
daß das Ausgangssignal des Substratspannungsgenerators 12 am
20 Ausgang 36, d.h. die erzeugten und über das Substrat 10
eingekoppelten Substratspannungsgeneratorpulse stets gleich
aussehen.

Die beschriebene Kombination aus D-Flipflop 35 und Monoflop
25 33 garantiert, daß pro Rechteckperiode des
Frequenzgenerators nur ein einziger Einzelimpuls von
vorgewählter Dauer erzeugt wird, der zur hochfrequenten
Wechselspannung des Hochfrequenzgenerators 31 synchronisiert
ist. Damit erzeugt der Substratspannungsgenerator 12
30 Ausgangsimpulse einstellbarer Dauer und stets gleichen
Signalverlaufes, die zu der hochfrequenten Grundschwingung
des Hochfrequenzgenerators 31 synchronisiert sind.

Der Phasenschieber 30 zwischen CEX-Ausgang des Hochfrequenzgenerators 31 und dem Takteingang des D-Flipflops 34 erlaubt es, die Phasenlage der in jedem Einzelimpuls bzw. Ausgangsimpuls des Hochfrequenzgenerators 31 enthaltenen hochfrequenten Schwingungsperioden innerhalb der Pulsbreite zu variieren. Der Phasenschieber kann damit insbesondere so abgeglichen werden, daß die hochfrequenten Schwingungsperioden der Wechselspannung gerade mit dem Einsetzen des Ausgangsimpulses des Substratspannungsgenerators 12 beginnen und mit dem Abklingen dieses Ausgangsimpulses enden, so daß jeder Ausgangsimpuls gerade eine ganze Zahl von Schwingungsperioden bzw. Sinushalbwellen umfaßt. Im einfachsten Fall ist der Phasenschieber 30 ein Koaxialkabel von definierter Länge als Verzögerungsleitung.

Die in Figur 5 beschriebene Schaltung ist im übrigen lediglich exemplarisch. An deren Stelle kommen weiter auch andere Vorrichtungen, beispielsweise ein Synchroneiliter, welcher die Frequenz des generatorinternen Oszillators dividiert und daraus Einzelimpulse und Pausen zwischen den Einzelimpulsen ableitet, in Frage.

Die vorteilhafte Wirkung der in den vorstehenden Ausführungsbeispielen eingesetzten, insbesondere sehr kurzen Hochfrequenzleistungspulse mit hoher Amplitude, die über den Substratspannungsgenerator 12 in das Substrat 10 eingekoppelt werden, beruht auf folgenden Mechanismen im Plasma 14:

An einer einem Plasma 14 ausgesetzten Substratelektrode 11, welche über den Substratspannungsgenerator 12 mit einer hochfrequenten Spannung oder Hochfrequenzleistung beaufschlagt wird, stellt sich bekanntermaßen eine negative

Gleichspannung gegenüber dem Plasma 14 und gegenüber Erdpotential ein. Diese als "Biasspannung" oder "Self-bias" bezeichnete Gleichspannung resultiert aus der unterschiedlichen Beweglichkeit von Elektronen und positiven Ionen im elektrischen Wechselfeld. Während die leichten Elektronen dem hochfrequenten Wechselfeld instantan folgen und während der positiven Halbwellen der Wechselspannung die Substratelektrode 11 sehr leicht erreichen können, ist dies für die wesentlich schwereren positiven Ionen während der negativen Halbwellen der Wechselspannung mit zunehmender Frequenz des elektrischen Wechselfelds immer weniger möglich. Infolgedessen kommt es zu einer negativen Aufladung der Substratelektrode 11 durch den Überschuß an eintreffenden Elektronen gegenüber den eintreffenden positiven Ionen, bis sich ein Sättigungswert der Aufladung einstellt und im Zeitmittel gleich viele Elektronen wie positiv geladene Ionen die Substratelektrode 11 erreichen. Diesem Sättigungswert der negativen Aufladung entspricht die Substratelektrodenspannung.

Die Figur 6 zeigt zur Erläuterung dieses Effektes ein einfaches elektrisches Ersatzschaltbild für ein einem Plasma 14 ausgesetztes, mit einer Hochfrequenzleistung aus dem Substratspannungsgenerator 12 gespeistes Substratelektrodenoberflächenelement 37. Die Ankopplung zur Erde erfolgt dabei über das Plasma 14, das durch die Parallelschaltung von Widerstand R und Diode D symbolisiert wird. Die Diode D trägt dem Effekt der Selbstgleichrichtung durch die unterschiedliche Beweglichkeit von Elektronen und Ionen im Plasma 14 Rechnung, der Widerstand R der Energiedissipation ins Plasma 14 (Wirkwiderstand). Die Kapazität C (Blindwiderstand) ist im wesentlichen eine apparative Konstante des Aufbaus der Substratelektrode 11.

Bei einem Pulsbetrieb unter Einsatz von hochfrequenten Substratspannungsgeneratorpulsen baut sich demnach an der Substratelektrode 11 zu Anfang eines jeden Pulses eine Substratelektrodenspannung auf, die nach einer Anzahl 5 hochfrequenter Schwingungsperioden einen Sättigungswert erreicht und dort bis zum Ende des Pulses verharrt. Nach dem Ende des hochfrequenten Schwingungspakets klingt diese Substratelektrodenspannung während der Impulspause durch Entladeprozesse dann wieder ab. Eine typische Anzahl von Schwingungsperioden, welche zum Erreichen einer stationären 10 Substratelektrodenspannung benötigt wird, liegt bei einer Hochfrequenz von 13,56 MHz und einem hochdichten induktiv gekoppelten Plasma 14, das in Kontakt mit der Substratelektrode steht, bei etwa 20 bis 100 15 Schwingungsperioden.

Durch den Einsatz von sehr kurzen Einzelimpulsen, welche nur wenige Schwingungsperioden, vorzugsweise weniger als 10 Schwingungsperioden umfassen, ist demnach der Sättigungswert 20 der Substratelektrodenspannung noch nicht erreicht und die Substratelektrodenspannung noch im Ansteigen begriffen. Dies wird in Figur 7 erläutert, die zeigt, wie sich die Substratelektrodenspannung U_{Bias} als Funktion der Zahl der Schwingungsperioden n der Grundschwingung der in das Substrat 10 eingekoppelten hochfrequenten 25 Wechselspannung (13,56 MHz) entwickelt.

Die letztlich erreichte Höhe der Lokalspannung im Sättigungsfall nach vielen Schwingungsperioden hängt dabei wesentlich ab vom Wirkwiderstand R (Energiedissipation ins 30 Plasma) und der Kapazität C des Kondensator (Blindleistungsanteil) gemäß Figur 6. Der Sättigungswert der Substratelektrodenspannung, der sich nach vielen Schwingungsperioden auf der Substratoberfläche einstellt,

hängt somit in hohem Maße vom Plasmawiderstand R ab (siehe Figur 6) d.h. von der Energiedissipation in das Plasma 14, welche jedoch in der Regel lateral über das Substrat 10 inhomogen ist.

5

Somit treten lokale Unterschiede hinsichtlich der Energiedissipation in das Plasma 14 beispielsweise zwischen Mitte und Rand eines Substrats 10 auf, was zu Spannungsgradienten zwischen verschiedenen Oberflächenbereichen des Substrates 10 führt. Diese Spannungsgradienten werden weiter dadurch wesentlich verstärkt, daß die Oberfläche des Substrates 10 infolge vielfach verwendeter dielektrischer Maskierschichten (Photolack, SiO₂-Maske usw.) beim Ätzen zumindest 15 bereichsweise elektrisch isolierend oder nur schwach leitend ist.

10

Insofern stellt die Substratoberfläche 10 aufgrund der erläuterten Effekte keine Äquipotentialfläche mehr dar, sondern auftretende Spannungsgradienten von Substratmitte zu Substratrand wirken gegenüber dem Plasma 14 als elektrische Linse, was schließlich zu einer Ablenkung der zum Substrat 10 beschleunigten Ionen aus der Vertikalen und damit zu Störung in den erzeugten Ätzprofilen führt.

20

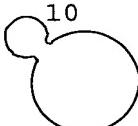
Durch die eingesetzten, sehr kurzen Substratelektrodenleistungspulse wird daher eine erhebliche Homogenisierung der Substratelektrodenspannung über die Substratoberfläche unabhängig von örtlich möglicherweise verschiedenen Plasmawiderständen R erreicht. Dies wird in 30 Figur 7 durch den linearen Kurvenverlauf im Fall einer nur geringen Zahl von Schwingungsperioden n veranschaulicht. Insgesamt erreicht man durch die erläuterten Maßnahmen somit einen drastischen Abbau von Spannungsgradienten auf der

25

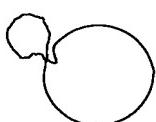
Substratoberfläche, einen Wegfall der unerwünschten elektrischen Linsenwirkung und schließlich zu deutlich verminderten Profilschrägen, beispielsweise in aus dem Substrat herausstrukturierten Trenchgräben.

5

Weiter ist durch relativ lange Impulspausen nach jedem relativ kurzen Einzelimpuls sichergestellt, daß eine zuvor erreichte negative Substratelektrodenspannung zumindest weitgehend wieder abgebaut wird. Jeder Substratelektrodenleistungspuls startet somit von einem gleichen, definierten, entladenen Ausgangszustand der Substratoberfläche.



15 Durch das beschriebene Pulsen der Substratelektrodenleistung wird im übrigen nur ein Bruchteil der Substratelektrodenspannung erreicht, die sich sonst, d.h. bei Erreichen des Sättigungswerts nach vielen Schwingungsperioden einstellen würde. Sollen daher hohe oder sehr hohe Substratelektrodenspannungen von im zeitlichen
20 Mittel beispielsweise 20 Volt bis 100 Volt realisiert werden, muß mit entsprechend großen Hochfrequenzspitzenleistungen während der Einzelimpulse operiert werden.

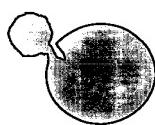
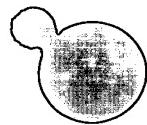


Bezugszeichenliste

	1	frequenzselektives Bauteil
5	1'	Filterkennlinie
	1''	Stationärfrequenz
	2	Anpaßnetzwerk
	3	Leistungsverstärker
	4	Quarzoszillator
10	5	Plasmaätzanlage
	6	Schwingquarz
	7	Verzögerungsleitung
	8	Leitung
	9	Generatorsteuereingang
15	9'	Generatorstatusausgang
	10	Substrat
	11	Substratelektrode
	12	Substratspannungsgenerator
20	13	ICP-Quelle
	14	induktiv gekoppeltes Plasma
	15	Reaktor
	16	erster Impedanztransformator
	17	ICP-Spulengenerator
25	18	zweiter Impedanztransformator
	19	Gaszufuhr
	20	Gasabfuhr
	21	Magnetfeldspule
30	22	Distanzstück
	23	Stromversorgungseinheit
	24	Auskoppelkondensator
	25	Signalabgriff
	26	Mittelabgriff

- 30 Phasenschieber
- 31 Hochfrequenzgenerator
- 32 Steuervorrichtung
- 5 33 Monoflop
- 34 U/f-Wandlervorrichtung
- 35 D-Flipflop
- 36 Generatorausgang
- 37 Substratelektrodenoberfläche

10



16.07.99 Kut

ROBERT BOSCH GMBH, 70442 Stuttgart

5

Patentansprüche

10 1. Vorrichtung zum Ätzen eines Substrates (10), insbesondere eines Siliziumkörpers, mittels eines induktiv gekoppelten Plasmas (14), mit einer ICP-Quelle (13) zum Generieren eines hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeldes und einem Reaktor (15) zum Erzeugen des induktiv gekoppelten Plasmas (14) aus reaktiven Teilchen durch Einwirken des hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeldes auf ein Reaktivgas, dadurch gekennzeichnet, daß ein erstes Mittel vorgesehen ist, mit dem mit der ICP-Quelle (13) in das induktiv gekoppelte Plasma (14) einzukoppelnde Plasmaleistungspulse erzeugbar sind.

20 2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das erste Mittel ein ICP-Spulengenerator (17) ist, der eine hinsichtlich des Puls-zu-Pause-Verhältnisses der Plasmaleistungspulse und/oder der Einzelpulsleistung variabel einstellbare, gepulste Hochfrequenzleistung erzeugt.

25 3. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß zur Anpassung einer Ausgangsimpedanz des ICP-Spulengenerators (17) an eine von der Einzelpulsleistung der einzukoppelnden Plasmaleistungspulse abhängige Plasmaintimpedanz ein Impedanztransformator (18) in Form eines insbesondere balancierten symmetrischen Anpaßnetzwerkes vorgesehen ist.

4. Vorrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet,
daß der Impedanztransformator (18) derart voreingestellt
ist, daß bei einer vorgegebenen maximalen Einzelpulsleistung
der in das induktiv gekoppelte Plasma (14) einzukoppelnden
Plasmaleistungspulse im stationären Leistungsfall eine
zumindest weitgehend optimale Impedanzanpassung
gewährleistet ist.

10 5. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet,
daß in den ICP-Spulengenerator (17) Bauteile integriert
sind, die über eine Variation der Frequenz des erzeugten
elektromagnetischen Wechselfeldes eine Impedanzanpassung als
Funktion der einzukoppelnden Einzelpulsleistung vornehmen.

15 6. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet,
daß der ICP-Spulengenerator (17) mit einem selbstdäig
wirkenden Rückkopplungsschaltkreis mit einem
frequenzselektiven Bauteil (1) versehen ist, wobei der
20 Rückkoppelschaltkreis mindestens einen geregelten
Leistungsverstärker, ein frequenzselektives Bandfilter mit
einer zu erreichenden Stationärfrequenz (1") und eine
Verzögerungsleitung (7) oder einem Phasenschieber aufweist.

25 7. Vorrichtung nach mindestens einem der vorangehenden
Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein zweites Mittel
vorgesehen ist, das zwischen dem Substrat (10) und der ICP-
Quelle (13) ein statisches oder zeitlich variierendes,
insbesondere gepulstes Magnetfeld erzeugt.

30 8. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet,
daß das erste Mittel eine Magnetfeldspule (21) mit
zugehöriger Stromversorgungseinheit (23) oder ein
Permanentmagnet ist, wobei das von der Magnetfeldspule (21)

erzeugte Magnetfeld mittels der Stromversorgungseinheit (23) zeitlich variierbar, insbesondere pulsbar ist.

5 9. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß ein Substratsspannungsgenerator (12) vorgesehen ist, mit dem das Substrat (10), insbesondere das auf einer Substratelektrode (11) angeordnete Substrat (10), mit einer kontinuierlichen oder zeitlich variierenden, insbesondere gepulsten Hochfrequenzleistung beaufschlagbar ist.



10 10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß zur Impedanzanpassung zwischen dem Substratsspannungsgenerator (12) und dem Substrat (10) ein erster Impedanztransfomator (12) vorgesehen ist.

15 11. Vorrichtung nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der ICP-Spulengenerator (17) mit dem Substratsspannungsgenerator (12)

und/oder der Stromversorgungseinheit (23) in Verbindung steht.



20 12. Verfahren zum Ätzen eines Substrates (10), insbesondere eines Siliziumkörpers, mit einer Vorrichtung nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zumindest zeitweise eine gepulste

25 Hochfrequenzleistung als gepulste Plasmaleistung in das ~~induktiv gekoppelte Plasma (14) eingekoppelt wird.~~

30 13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß die gepulste Plasmaleistung über eine ICP-Quelle (13) eingekoppelt wird, die mit einem hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeld mit einer konstanten Frequenz oder mit einer innerhalb eines Frequenzbereiches um

eine Stationärfrequenz (1'') variierenden Frequenz beaufschlagt wird.

14. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet,
5 daß die gepulste Hochfrequenzleistung mit einem ICP-
Spulengenerator (17) erzeugt wird, der mit einer Frequenz
von 10 Hz bis 1 MHz und einem Puls-zu-Pause-Verhältnis von
1:1 bis 1:100 gepulst betrieben wird.

10 15. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet,
daß im zeitlichen Mittel eine Plasmaleistung von 300 Watt
bis 5000 Watt in das induktiv gekoppelte Plasma (14)
eingekoppelt wird, und daß die erzeugten
15 Einzelpulsleistungen der Hochfrequenzleistungspulse zwischen
300 Watt und 20 kWatt, insbesondere 2 kWatt bis 10 kWatt,
betragen.

20 16. Verfahren nach Anspruch 12 oder 13, dadurch
gekennzeichnet, daß das Pulsen der eingekoppelten
Hochfrequenzleistung von einer Veränderung der Frequenz der
eingekoppelten Hochfrequenzleistung begleitet wird, wobei
die Frequenzveränderung so gesteuert wird, daß die während
des Pulses in das induktiv gekoppelte Plasma (14)
eingekoppelte Plasmaleistung maximiert wird.

25 17. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 12 bis

30 16.
dadurch gekennzeichnet, daß bei dem Ätzen ein statisches
oder zeitlich variierendes, insbesondere periodisch
variierendes oder gepulstes Magnetfeld erzeugt wird, dessen
Richtung zumindest näherungsweise oder überwiegend parallel
zu einer durch die Verbindungsleitung von Substrat (10) und
induktiv gekoppeltem Plasma (14) definierten Richtung ist.

18. Verfahren nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet,
daß das Magnetfeld derart erzeugt wird, daß es sich in den
Bereich des Substrates (10) und des induktiv gekoppelten
Plasmas (14) erstreckt und im Inneren des Reaktors (15) eine
Amplitude der Feldstärke zwischen 10 mTesla und 100 mTesla
aufweist.

10 19. Verfahren nach Anspruch 17 oder 18, dadurch
gekennzeichnet, daß über die Stromversorgungseinheit (23)
ein mit einer Frequenz von 10 Hz bis 20 kHz gepulstes
Magnetfeld erzeugt wird, wobei das Puls-zu-Pause-Verhältnis
beim Pulsen des Magnetfeldes zwischen 1:1 und 1:100 liegt.

15 20. Verfahren nach mindestens einem der vorangehenden
Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Substrat (10)
über einen Substratspannungsgenerator (12) mit einer
konstanten oder zeitlich variierbaren, insbesondere
gepulsten Hochfrequenzleistung beaufschlagt wird.

20 21. Verfahren nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet,
daß die Pulsdauer der in das Substrat eingekoppelten
Hochfrequenzleistung zwischen dem 1-fachen und 100-fachen,
insbesondere dem 1-fachen und 10-fachen, der
Schwingungsdauer der hochfrequenten Grundschwingung der
Hochfrequenzleistung liegt.

22 ~~Verfahren nach Anspruch 20 oder 21, dadurch~~
gekennzeichnet, daß die Hochfrequenzleistung das Substrat
(10) mit einer zeitlichen Durchschnittsleistung von 5 Watt
bis 100 Watt beaufschlagt, wobei die Maximalleistung eines
einzelnen Hochfrequenzleistungspulses das 1-fache bis 20-
fache, insbesondere das 2-fache bis 10-fache, der zeitlichen
Durchschnittsleistung beträgt.

23. Verfahren nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet,
daß die Frequenz der eingekoppelten Hochfrequenzleistung
zwischen 100 kHz bis 100 MHz, insbesondere 13,56 MHz,
beträgt, und daß das Puls-zu-Pause-Verhältnis der
eingekoppelten Hochfrequenzleistungspulse zwischen 1:1 und
1:100, insbesondere 1:1 und 1:10, liegt.

5

24. Verfahren nach mindestens einem der vorangehenden
Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Pulsen der
eingekoppelten Plasmaleistung und das Pulsen der über den
Substratspannungsgenerator (12) in das Substrat (10)
eingekoppelten Hochfrequenzleistung oder das Pulsen des
Magnetfeldes, das Pulsen der eingekoppelten Plasmaleistung
und das Pulsen der über den Substratspannungsgenerator (12)
15 in das Substrat (10) eingekoppelten Hochfrequenzleistung
zeitlich miteinander korreliert oder synchronisiert wird.

10

25. Verfahren nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet,
daß die Korrelation derart erfolgt, daß vor einem
Hochfrequenzleistungspuls des ICP-Spulengenerators (17)
zunächst das Magnetfeld angelegt, und daß das Magnetfeld
nach dem Abklingen dieses Hochfrequenzleistungspulses wieder
abgeschaltet wird.

20

25. Verfahren nach Anspruch 24 oder 25, dadurch
gekennzeichnet, daß die Korrelation derart erfolgt, daß
während eines Hochfrequenzleistungspulses des ICP-
Spulengenerators (17) die über den
Substratspannungsgenerator (12) in das Substrat (10)
30 eingekoppelte Hochfrequenzleistung abgeschaltet wird
und/oder daß während eines über den
Substratspannungsgenerator (12) in das Substrat (10)
eingekoppelten Hochfrequenzleistungspulses die über den ICP-



25

26. Verfahren nach Anspruch 24 oder 25, dadurch
gekennzeichnet, daß die Korrelation derart erfolgt, daß
während eines Hochfrequenzleistungspulses des ICP-
Spulengenerators (17) die über den
Substratspannungsgenerator (12) in das Substrat (10)
30 eingekoppelte Hochfrequenzleistung abgeschaltet wird
und/oder daß während eines über den
Substratspannungsgenerator (12) in das Substrat (10)
eingekoppelten Hochfrequenzleistungspulses die über den ICP-

Spulengenerator (17) eingekoppelte Hochfrequenzleistung abgeschaltet wird.

27. Verfahren nach Anspruch 24 oder 25, dadurch gekennzeichnet, daß die Synchronisation derart erfolgt, daß das Substrat (10) jeweils während der Dauer eines über den ICP-Spulengenerators (17) in das Plasma (14) eingekoppelten Plasmaleistungspulses mit über den Substratspannungsgenerator (12) in das Substrat (10) eingekoppelten Hochfrequenzleistungspulsen beaufschlagt wird.

28. Verfahren nach Anspruch 24 oder 25, dadurch gekennzeichnet, daß die Korrelation derart erfolgt, daß die über den Substratspannungsgenerator (12) in das Substrat (10) eingekoppelte Hochfrequenzleistung jeweils während eines Leistungsanstieges und/oder eines Leistungsabfalles eines über den ICP-Spulengenerator (17) in das Plasma (14) eingekoppelten Hochfrequenzleistungspulses erzeugt wird.

29. Verfahren nach Anspruch 24 oder 25, dadurch gekennzeichnet, daß die Korrelation derart erfolgt, daß während der Dauer der über den ICP-Spulengenerators (17) in das Plasma (14) eingekoppelten Plasmaleistungspulse und während der Dauer der Pulspausen der einzelnen über den ICP-Spulengenerators (17) in das Plasma (14) eingekoppelten Plasmaleistungspulse das Substrat (10) jeweils mit

mindestens einem über den Substratspannungsgenerator (12) in das Substrat (10) eingekoppelten Hochfrequenzleistungspuls beaufschlagt wird.

30. Verfahren nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Ätzen in

alternierenden Ätz- und Passivierschritten bei einem
Prozeßdruck von 5 μ bar bis 100 μ bar erfolgt.

16.07.99 Kut

ROBERT BOSCH GMBH, 70442 Stuttgart

5

Vorrichtung und Verfahren zum Ätzen eines Substrates
mittels eines induktiv gekoppelten Plasmas

10

Zusammenfassung

15

Es wird ein Verfahren und eine zur Durchführung dieses Verfahrens geeignete Vorrichtung zum Ätzen eines Substrates (10), insbesondere eines Siliziumkörpers, mittels eines induktiv gekoppelten Plasmas (14) vorgeschlagen. Dazu wird mit einer ICP-Quelle (13) ein hochfrequentes elektromagnetisches Wechselfeld generiert, das in einem Reaktor (15) ein induktiv gekoppeltes Plasma (14) aus

20

reaktiven Teilchen erzeugt. Das induktiv gekoppelte Plasma (14) entsteht dabei durch Einwirken des hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeldes auf ein Reaktivgas.

25

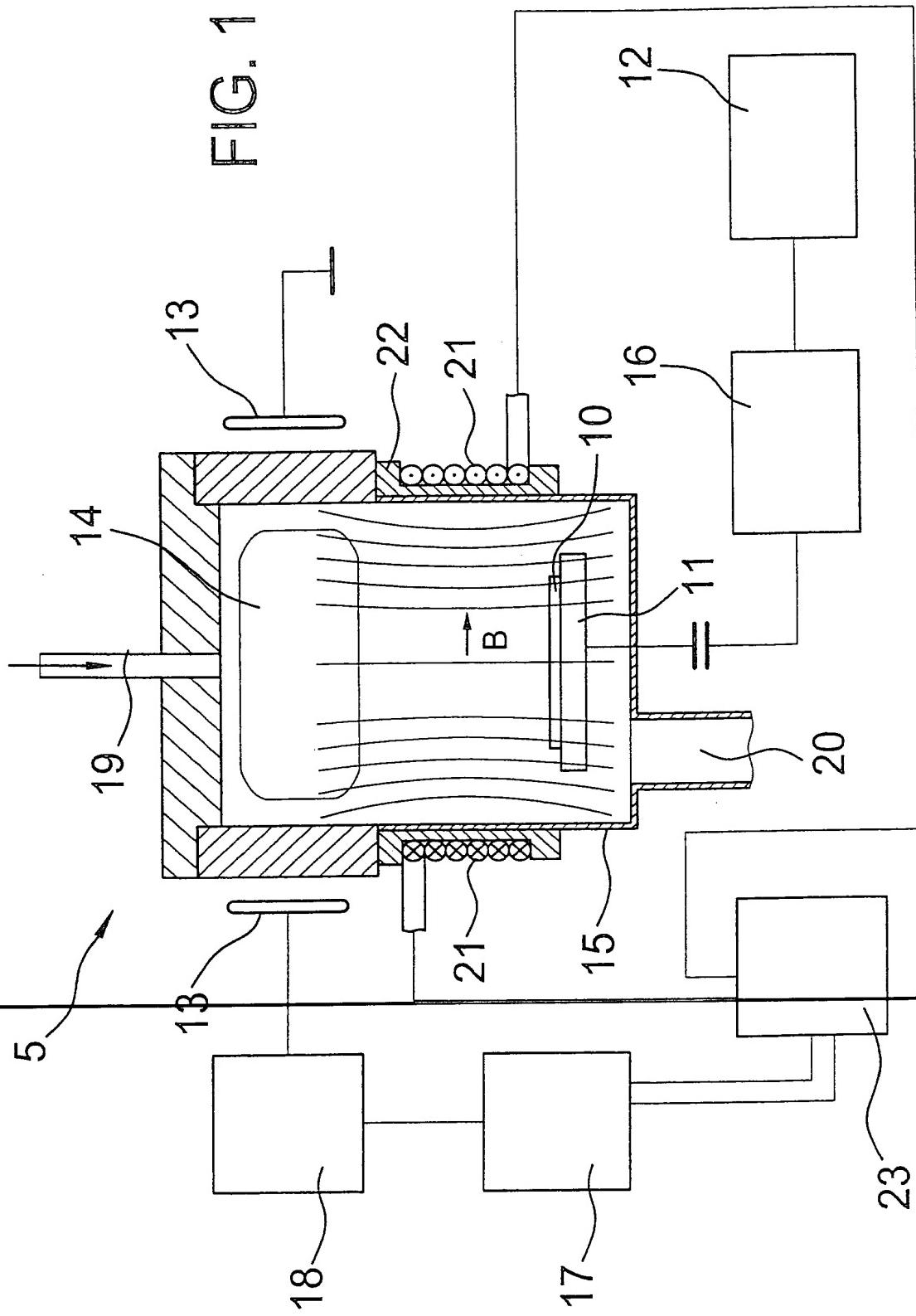
Weiterhin ist eine Einrichtung vorgesehen, mit der eine mit der ICP-Quelle (13) in das induktiv gekoppelte Plasma (14) über das hochfrequente elektromagnetische Wechselfeld eingekoppelte Plasmaleistung pulsbar ist, so daß zumindest zeitweise eine gepulste Hochfrequenzleistung als

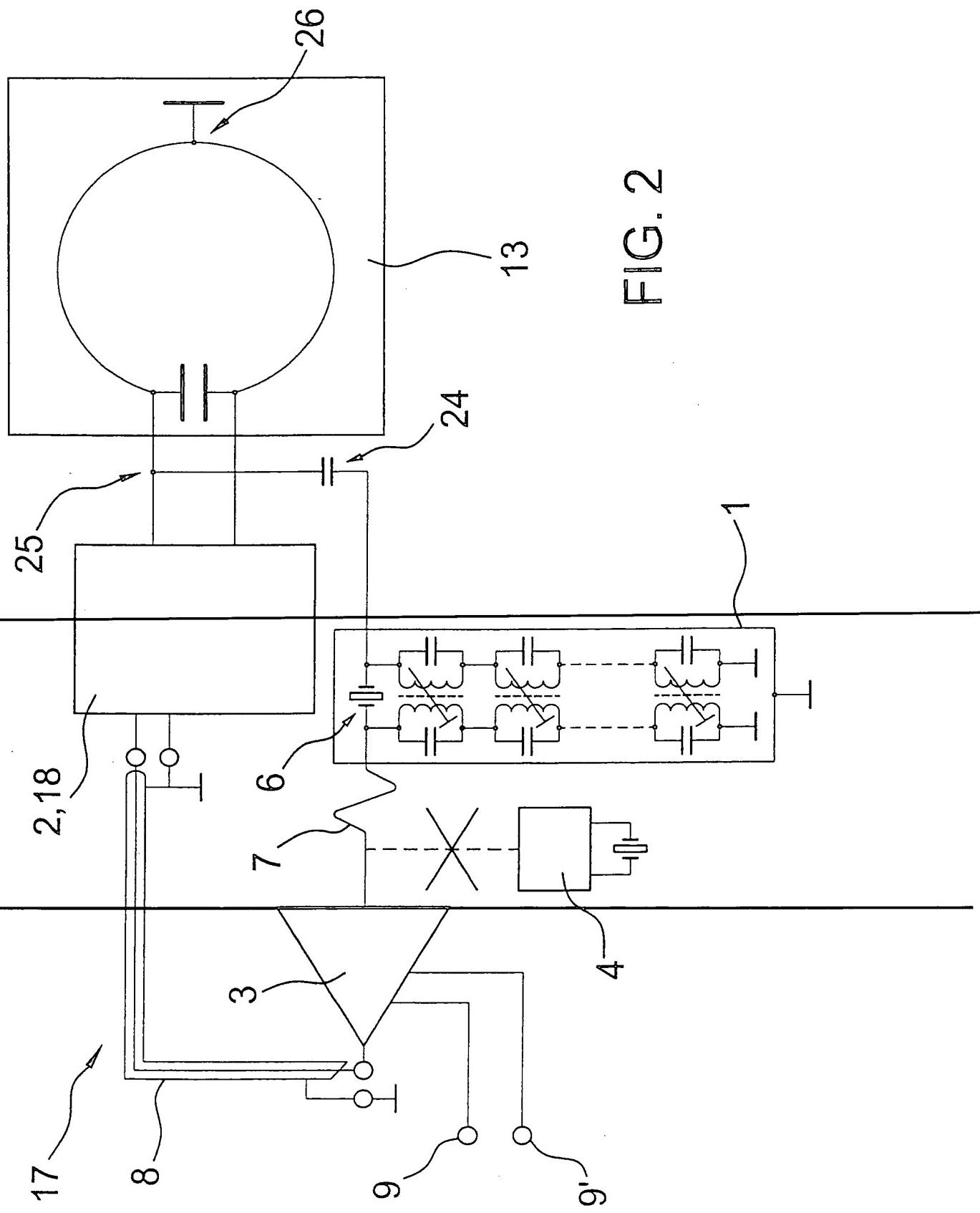
30

Plasmaleistung in das induktiv gekoppelte Plasma (14) eingekoppelt werden kann. Die gepulste Plasmaleistung kann weiter mit einem gepulsten Magnetfeld und/oder einer gepulsten Substratelekrodenleistung kombiniert oder korreliert werden.

Figur 1

FIG. 1





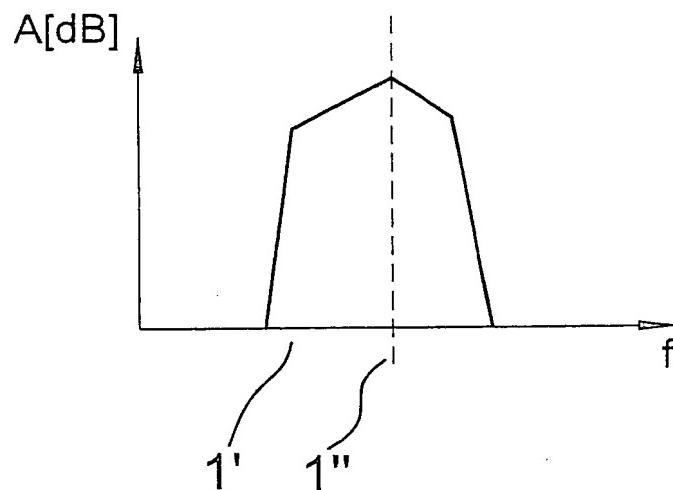
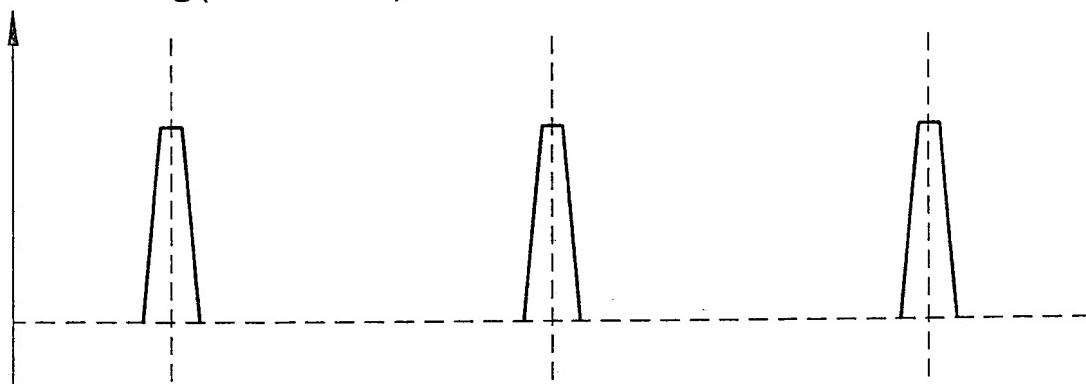


FIG. 3

Hochfrequenz-
Leistung(HF-Pulse)



Magnetspulen-
Strom(Strom-Pulse)

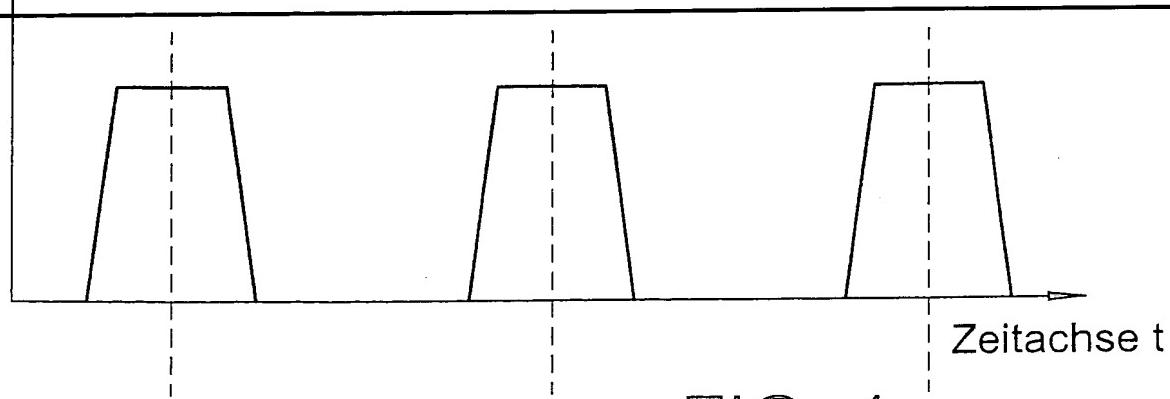


FIG. 4

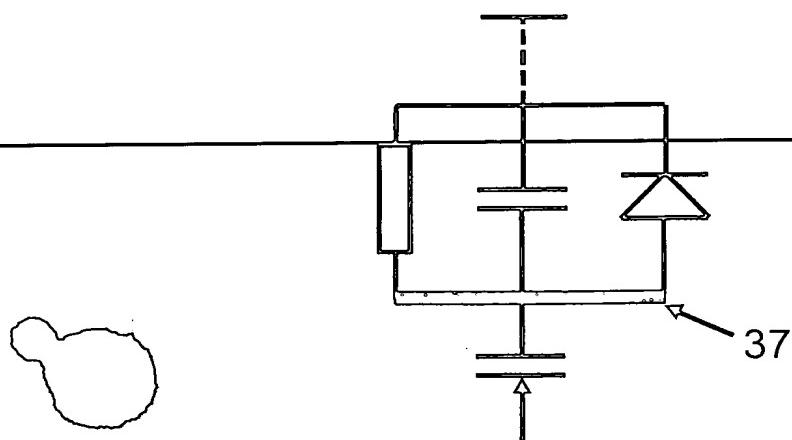
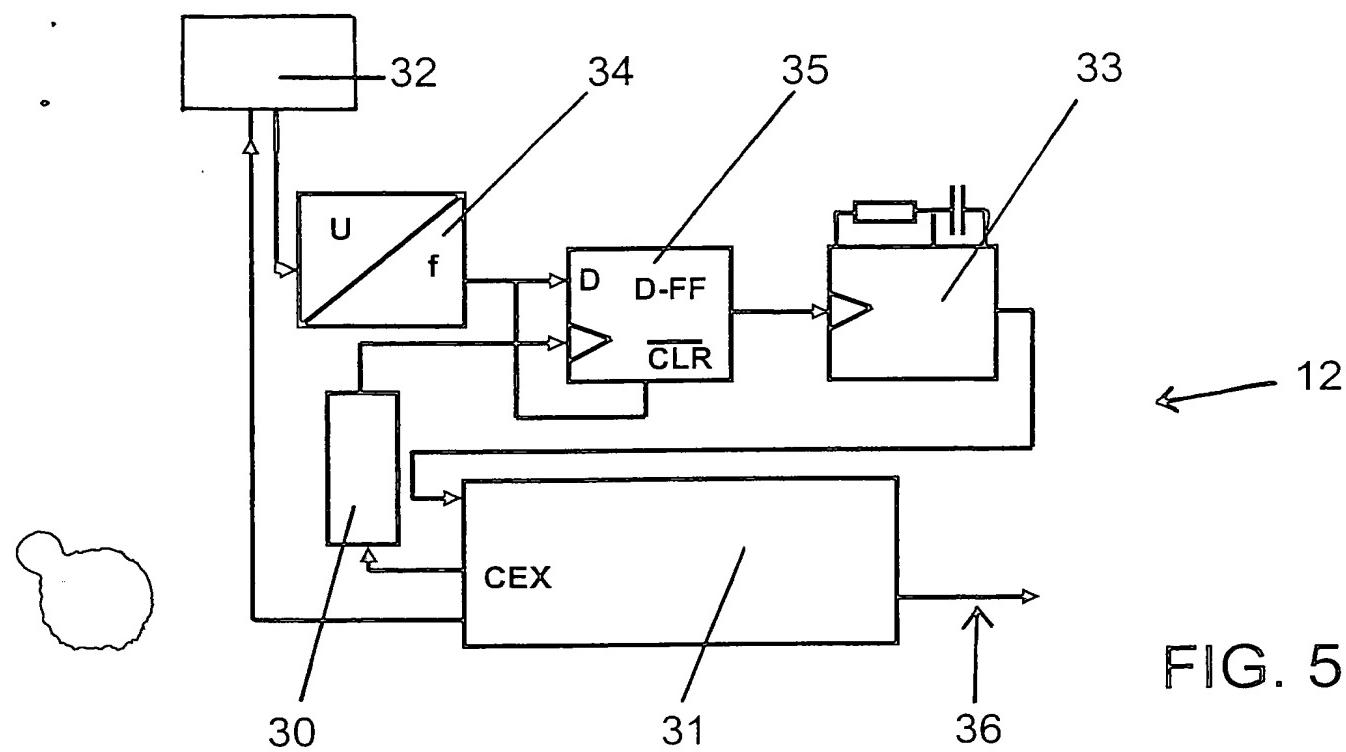


FIG. 6

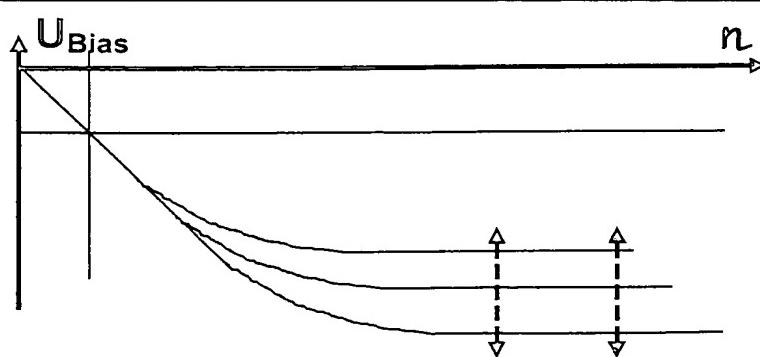


FIG. 7

